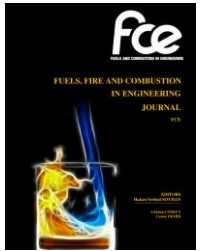


	MÜHENDİSLİKTE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA DERGİSİ <i>FUELS, FIRE AND COMBUSTION IN ENGINEERING JOURNAL</i>		
	eISSN: 2564-6435 Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/fce		
	<u>Geliş/Received</u> 26.12.2024 <u>Kabul/Accepted</u> 10.12.2025	<u>Doi:</u> 10.52702/fce.1607775	

Lityum İyon Bataryalarda Meydana Gelen Termal Kaçak Nedenlerinin Araştırılması ve Gaz Salımının İncelenmesi

Ayşegül KIRDUDU *¹, Hakan Serhad SOYHAN²

ÖZ

Enerji yoğunluğu fazla olan lityum iyon bataryalar (LIB) çevre, yakıt maliyeti vb. avantajlarından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve küresel ısınma ile mücadele amacıyla elektrikli araçlar oldukça tercih edilmektedir. Lityum iyon bataryaların elektrikli araçlarda tercih edilmesi ile birlikte dikkat edilmesi gereken bazı güvenlik durumları ortaya çıkmıştır. Bataryaların hücrelerinde meydana gelebilecek ısı artışı, darbe etkisi, aşırı şarj veya deşarj, sıcaklık değişimleri, jet alevine, radyan ısıya maruz kalma vb. faktörlere bağlı olarak termal kaçak oluşabilmekte, termal kaçak sonucu yangın ve patlamalar meydana gelebilmektedir. Elektrikli araçlarda arızalar olabileceği gibi insan kaynaklı yanlış kullanımlar sonucu da bazı problemler gerçekleşebilmektedir. Bu problemler de termal kaçak oluşumuna neden olabilmektedir. Oluşan termal kaçak mekanik, elektriksel ve termal etki olarak üç gruba ayrılır. Makale, bataryalarda meydana gelen gaz salımlarını, batarya yönetim sistemini, batarya termal yönetim sistemini ve tüm bu sistemlerin çalışma prensibini, çalışma mekanizmasını ve termal kaçak oluşum mekanizmasını parametrik olarak incelemeyi hedeflemektedir. 18650 hücre boyutlu lityum iyon piller kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda pillerin dış etkenlerden alabileceği darbeler sonrası oluşabilecek termal kaçak durumu, gaz salımları ve sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. Lityum iyon batarya yangınlarının çıkmasını engelleyebilecek erken uyarı sistemleri ve termal kaçak yayılımını azaltacak veya durduracak etkenleri tespit edebilmek oluşabilecek kayıp ve hasarı en aza indirerek elektrikli araçlarda güvenliğin artmasını sağlamak büyük öneme sahiptir. Pillerin SOC seviyesi, pil kimyası, darbe yeri ve sayısı vb. birçok faktör termal kaçak sürecini etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Lityum İyon Bataryalar, Termal Kaçak, Lityum İyon Bataryalarda Oluşan Gaz Salımları

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Ayşegül KIRDUDU, Sakarya Üniversitesi, Yangın ve Yangın Güvenliği EABD, aysegul.kirdudu1@ogr.sakarya.edu.tr,

 0000-0001-9397-5250

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Yangın Uygulama ve Araştırma Merkezi

hsoyhan@sakarya.edu.tr,  0000-0003-3723-9640

ABSTRACT

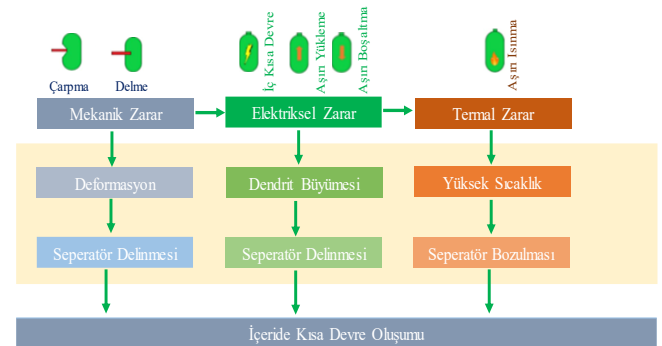
Lithium-ion batteries (LIB) with high energy density are used in many areas due to their advantages such as environmental, fuel cost, etc. Electric vehicles (EV) are highly preferred in order to reduce fossil fuel consumption and combat global warming. With the preference of lithium-ion batteries in electric vehicles, some safety issues that need to be considered have emerged. Thermal runaway (TR) may occur due to factors such as heat increase, impact, overcharging, overdischarging, temperature changes, exposure to jet flame, exposure to radiant heat, etc. in the cells of the batteries, and fire and explosions may occur as a result of thermal runaway. While there may be malfunctions in electric vehicles, there may also be some problems due to human-induced misuse in daily use. These problems can also cause thermal runaway. This thermal runaway is classified as mechanical, electrical and thermal effects. The article aims to parametrically examine the gas emissions in batteries, battery management system, battery thermal management system and the working principle, working mechanism and thermal runaway formation mechanism of all these systems. In studies conducted using lithium-ion batteries with 18650 cell size, thermal runaway, gas emissions and temperature changes that may occur after impacts that the batteries may receive from external factors are observed. Lithium-ion batteries with powers of 2400-2800-3600-4800 mAh. at 0-60-70-80% SOC (state of charge) levels are pierced with a nail and the results are observed. In this study, which includes sensors that detect H₂ (hydrogen), VOC (volatile organic compounds), HCl (hydrogen chloride), % LEL (lower explosion limit) and CO₂ (carbon dioxide) emissions, a thermal camera is used to observe temperature changes. 9 batteries of different types, some of which are 2800 mAh. at 0% and 80% SOC levels, 9 batteries with 4800 mAh. at 60% SOC level, and 2400 mAh at 70% SOC level. 4 batteries with 3600 mAh power and 8 separate batteries with 80% SOC level were observed by drilling. It is of great importance to be able to determine the factors that can prevent lithium-ion battery fires, reduce or stop the spread of thermal runaway, and to increase safety in electric vehicles by minimizing the possible losses and damages. Many factors such as the SOC level of the batteries, battery chemistry, impact location and number, etc. affect the thermal runaway process.

Keywords: Electric Vehicles, Lithium-Ion Batteries, Thermal Runaway, Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries

1. GİRİŞ

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan lityum iyon bataryaların (LIB) talep görmelerinin başında çevresel faktörü ve yakıt maliyeti açısından avantajlı olması gelmektedir [1]. LIB'ler bu avantajlarından dolayı pil teknolojisini kullanan birçok alanda ve özellikle elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2,3]. Elektrikli araçlar için tercih edilebilir bir güç kaynağı haline gelen lityum iyon bataryaların yangın riski gibi bazı güvenlik problemleri bulunmaktadır. Bu durum, LIB'lerin fazla enerji yoğunluğuna sahip olması ile ilgilidir. Bazı aşırı koşullarda, sınırlı alanda depolanan büyük miktardaki kimyasal enerji aniden dışarı çıkarak ısıya dönüşebilir [4]. Yangın kazalarının genellikle aşırı ısınma [5], çivi penetrasyonu [6], ezilme [7], aşırı şarj ve deşarj [8] vb. çeşitli

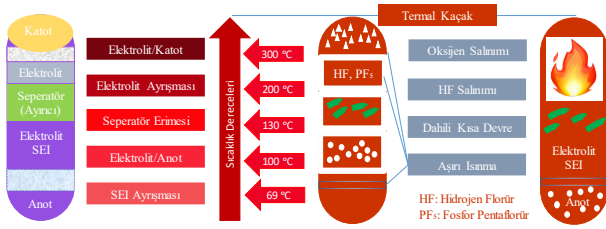
kötüye kullanımlar (mekanik, elektriksel ve termal kötüye kullanım) sonucu tetiklendiği gözlemlenmiştir [9].



Şekil 1. Termal Kaçağın Yaşanmasında Mekanik, Elektriksel ve Termal Etki [10]

Hücrelerin iç sıcaklığı 90 °C ile 120 °C aralığına ulaştığında ayrışma başlayarak katı elektrolit ara yüz tabakası ekzotermik bir reaksiyon başlatır.

Hidrokarbon elektrolit 200 °C' nin üzerinde bozunabilir ve aşırı ısı açığa çıkmasına neden olabilir [11]. Bu durum termal kaçak olarak bilinmektedir.



Şekil 2. Lityum İyon Bataryalarda Termal Kaçak Süreci

Tipik termal kaçak süreci, katı elektrolit ara yüzey tabakasının (SEI) parçalanması, elektrot malzemesinin elektrolitle reaksiyonu ve elektrolitin ayrışması şeklinde gerçekleşmektedir [12, 13].

LIB' lerin termal kaçak sırasında reaksiyon adımları [14]

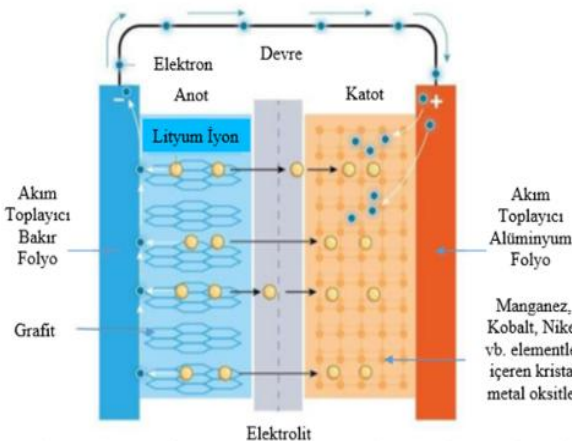
<90°C: Yanlış kullanım koşullarından birinin gerçekleşmesi.

90°C-120°C: Lityum tuzu LiPF_6 (grafit) ve SEI filmi çözülür ve ısıyı 120 °C'ye kadar artırır.

120°C-150°C: Son derece reaktif LiC_6 ekzotermal bir reaksiyon başlatır. Elektrolitlerin çözülmesi PF_5 (fosfor pentaflorür) oluşturur ve bu durum organik çözücülerin çözülmesini aktive eder.

150°C-200°C: Poliolefin ayırıcı erir, kısa devreye neden olur ve ısı salımını hızlandırır.

200°C-300°C: Katot malzemeleri yayılır ve oksijen salar, elektrolitlerle büyük bir oksidasyon reaksiyonu gerçekleşir. Büyük miktarda ısı ve hidrokarbon gazları salınır. Yanıcı gaz karışımı 300 °C’de yanar.

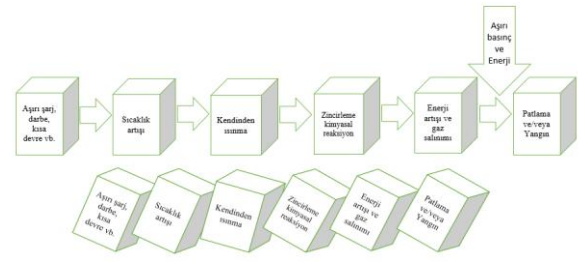


Şekil 3. Lityum İyon Pillerin İç Yapısı ve Çalışma Prensibi [15]

Ekzotermal reaksiyonlar neticesinde pilin sıcaklığı yükselir [16]. Termal kaçak süreci pilin iç

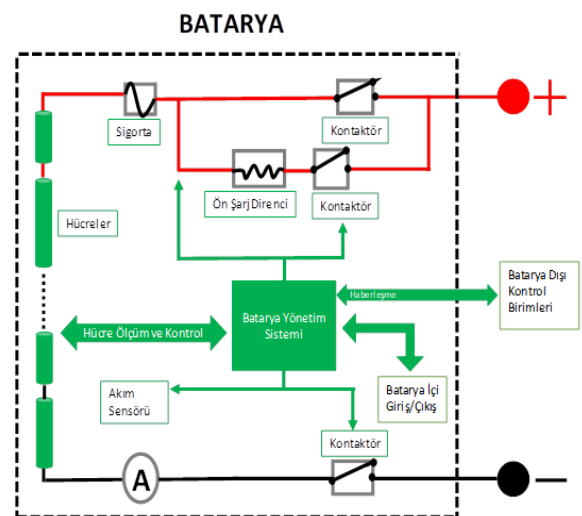
Lityum İyon Bataryalarda Meydana Gelen Termal Kaçak Nedenlerinin Araştırılması ve Gaz Salımının İncelenmesi

sıcaklığını daha da arttırarak geri dönüşü olmayan kazalara yol açacak bir kısır döngü oluşabilir.



Şekil 4. Lityum İyon Hücre Yangınlarına Yol Açan Domino Etkisi [17]

Aynı zamanda reaksiyon sırasında açığa çıkan yanıcı ve zehirli gaz ürünleri basınçta keskin bir artışa neden olabilir. Bu durum pilin şişmesine, jet alevleri oluşturmaya ve patlamaya yol açabilir [18,19]. Bu nedenle termal kaçak oluşumunun zamanında tespit edilmesi çok önemlidir. Gaz salımı, duman ve yangının gözlemlenmesinden daha erken ortaya çıktığı için, LIB’deki termal kaçak gazlarının tespitiyle arızanın erken fark edilmesi termal kaçak yayılımını önleyebilir. Kişilerin tahliye olması ve ekipmanın kapatılması için yeterli reaksiyon süresini sağlayabilir [20, 21].



Şekil 5. Batarya Yönetim Sistemi

LIB' lerin ana bileşenleri arasında paslanmaz veya alüminyum kabuk, plastik poşet, sıvı elektrolit, anot malzemesi, katot malzemesi, ayırıcı, bağlayıcı ve bakır (Cu) folyo bulunur. Bunların yangınları karmaşık yangınlardır. [22]. LIB' ler kendi kendine ısınarak bir termal kaçağa neden olabilir. Bu durum yüksek ısı ve zehirli gaz salımına ve özel güvenlik riskleri oluşturabilecek özel bir yanma davranışına yol açabilir. Ekzotermik termal kaçak reaksiyonları akü sıcaklığını artırır. Daha sonra yoğunlaşmış

maddeden gazlara faz geçişi meydana gelir. Üretilen gaz karışımı çeşitli hidrokarbonlardan oluşabilir. Bu yanıcı gazların tutuşması, daha önce tartışılanlara benzer yangın veya patlama senaryolarına yol açabilir [23]. LIB yangınları karmaşık yangınlar olarak tanımlanabilir. Salınan gazlardan bazıları yanıcı özellikte olmadığı halde çeşitli karışımlar ve reaksiyonlar sonucu yanıcılık durumu ortaya çıkabilmektedir. Salınan gazların erken tespit edilmesi ile yangınlar meydana gelmeden batarya paketleri içerisinde gerçekleştirilecek iyileştirme çalışmaları ile LIB yangınlarının önlenebileceği öngörülmektedir.

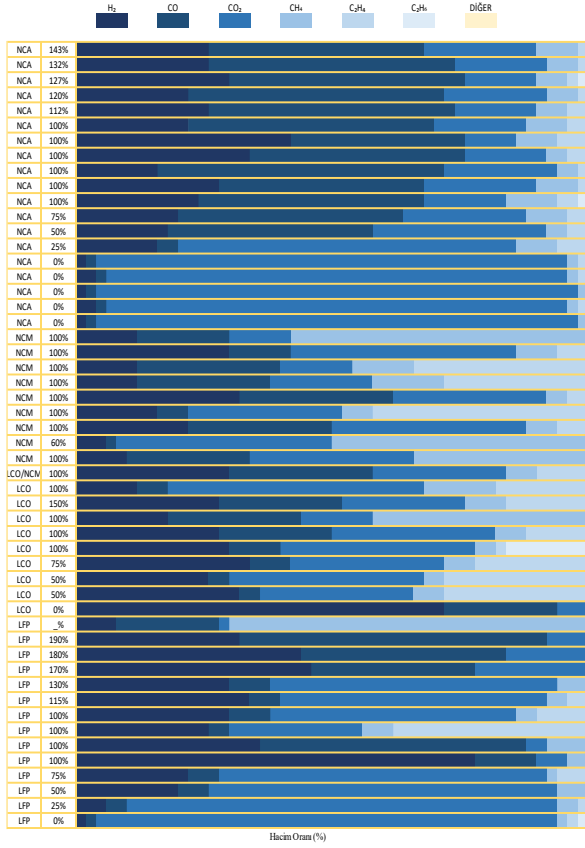
2. YÖNTEM

Bu çalışma LIB'lerin belirli çevresel koşullarda ve sayıda gerçekleştirilen deneyler ile elde edilen verilerinden oluşan bir araştırma çalışmasıdır. Gelecek araştırmalarda farklı batarya tipleri, farklı dış etkenler ve daha geniş çevresel koşulların etkileri incelenebilir. Bataryalarda gaz salımını azaltmaya yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi, güvenli kullanım, yangınlarının önlenmesi veya söndürülmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi önemlidir. LIB'lerde oluşacak gaz salımı davranışları batarya güvenliği açısından önemli bir konu olduğundan bu alandaki gelişmeler enerji depolama sistemlerindeki teknolojinin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Deneylerde 18650 hücre tipi lityum iyon piller, multimetre, kayıt cihazı, termal kamera, çivi ve sensörler (H_2 , VOC, HCl, % LEL ve CO_2) kullanılarak pillerde oluşan gaz salımları gözlemlenmiştir. Bataryaların dış etkenlere maruz kalması sonucu oluşan sıcaklık değişimleri termal kamera ile takip edilmiştir. Pil delinmeden önce multimetre ile ölçümleri yapılmış ve şarj durumları kayıt altına alınmıştır. 18.45 mm*65.05 mm ölçülerinde, farklı mAh. güçlerinde ve çeşitli doluluk oranlarında 30 adet LIB çivi vasıtasıyla delinerek gaz salımı başlangıcı ve termal kaçak evresine geçiş süreci gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan LIB parametreleri:

- Boyut: 18.45mm x 65.05mm
- 2400 mAh./2800 mAh./3600 mAh./4800 mAh.
- Çalışma Sıcaklığı: 0~45°C
- Çalışma Sıcaklığı (Deşarj): -20~60°C
- Ağırlık: 34-42 ± 3g
- LIB'ler yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve güvenilirliğiyle tanınan bir tür şarj edilebilir pildir. Standart boyutları nedeniyle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar ve bu da

onları hem tüketici hem de endüstriyel elektrotikte temel bir ürün haline getirir. Yangın tehlikesini değerlendirmek için en önemli parametrelerden biri ısı dağılım oranı (HRR) [24] dır. Yapılan deneysel bir çalışmada 100' den fazla gaz gözlemlenmiştir. [25]. Termal kaçakta üretilen gaz türleri karmaşık ve çeşitlidir. Lityum esaslı pillerin termal kaçaklarının erken uyarısını gerçekleştirmek için gaz algılama sensörlerini kullanmak teorik olarak mümkündür. Yapılan literatür araştırması lityum iyon pillerin iç kimyasal reaksiyonlarından ısıtma işlemi sırasında O_2 (oksijen), CO_2 (karbondioksit), C_2H_4 (etilen), C_4H_{10} (bütan), POF_3 (fosforil florür), C_2H_5F (floroetan), PF_5 (fosfor pentaflorür), H_2 (hidrojen) vb. çeşitli gazların yayıldığını göstermektedir [26,27,28,29]. Bir çalışma farklı sistemlere sahip dört çeşit LIB' nın yüzey sıcaklığı, voltaj değişimi, kütle kaybı ve gaz üretim karakteristik parametreleri incelenmiş, pillerinin termal kaçak sürecinde CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 ve diğer gazlar ürettiğini ortaya koymuştur [30]. Başka bir çalışmada, 18650 tipi lityum iyon pilin gaz üretim dinamikleri kalorimetre ve standart bir gaz geçirmez kutu kullanılarak araştırılmış ve gaz üretim sürecinin dört aşamaya ayrıldığı ancak her aşamanın veri güvenilirliğinin değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [31]. Yukarıda tespit edilen gazlar arasında bir bataryanın bozulmasını ifade eden gazın CO_2 olduğu bilinmektedir. Çünkü diğer gazlar bataryanın normal çalışma süresinde de salınabilmektedir [32]. Bu nedenle deneysel tespit amacıyla kullanılacak CO ve H_2 gaz sensörlerinin yanında bu çalışmada özellikle ortamdaki CO_2 gazını tespit eden gaz sensörleri de kullanılmaktadır. Sensörlerden alınan gaz ölçüm verileri kaydedilerek grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Termal Kaçak Sırasındaki Havalandırma Gazı Türlerinin Bileşimleri



Termal kaçağın başlaması ile birlikte sıcaklık 1000 °C' nin üzerine çıkabilir, yanıcı ve zehirli gazlar salınabilir [33].

$$Q = q_{rev} + q_{irev} + q_{de} \quad (1)$$

Q_{de}: Termal kaçak oluşumu sırasında malzeme deformasyonundan gelen ısıdır.
q_{de} denklem (2)' deki "Hatchard formülü" ile hesaplanabilir:

$$q_{de} = v \Delta H_C n A e \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (2)$$

V : Batarya hacmi (m³)
 ΔH :Elektrokimyasal reaksiyon ısısı (KJ/mol)
 C : Reaksiyon içindeki maddelerin konsantrasyonu (mol/L)
 n : Sırası
 A : Arrhenius denkleminden ön-eksponansiyel
 E_a : Reaksiyon aktivasyonu için enerji (KJ/mol)
 R : İdeal gaz sabiti değeri
 T : Reaksiyondaki sıcaklık
 Reaksiyon ısısı q_{rev} denklemdeki gibi hesaplanabilir:

$$q_{rev} = \frac{Q}{F \times 3600 \times I} \quad (3)$$

Q : Batarya içinde üretilen toplam ısı (J)
 F : Faraday sabit değeri 96,484.5 (C/mol)
 I : Akım (A)

Tersinmez ısı q_{irev} için hesaplama formülü denklem (4)' te formüle edilmiştir:

$$q_{irev} = Q_p (\text{potansiyel ısı üzeri}) + Q_j (\text{joule ısı}) \quad (4)$$

Aşırı potansiyel ısı için hesaplama formülü denklem (5)' te formüle edilmiştir:

$$Q_p = I^2 R_p = I^2 (R_0 + R_1 + R_2) \quad (5)$$

I : Akım (A)
 R_p : Polerizasyon iç direnç (Ω)
 R₀ : Ohmik polarizasyon iç direnç (Ω)
 R₁ : Konsantrasyon polarizasyon iç direnç (Ω)
 R₂ : İç direncin elektrokimyasal polarizasyonu (Ω)

Joule ısısı için hesaplama formülü denklem (6)' da formüle edilmiştir:

$$Q_j = I^2 R_\Omega \quad (6)$$

I : Akım (A)
 R_Ω : Bataryanın iç direnci (Ω)

Tablo 1. Deneyde kullanılan ekipmanın teknik özellikleri

SENSÖRLER	TERMAL KAMERA
ATEX/IECEX/UKEX/UL/IN METRO ve SIL2/SIL3 sertifikalarına sahip sabit gaz dedektörleri	Doğrudan Sıcaklık Ölçümü (DTM)
Exproof	Üç Modlu Hassasiyet
IEC EN 60079-29-1 standardına uygun olarak ölçüm yapan	Uygulamaya özel belirli renk modları

• Gaz dedektörleri yerleşimi ve kalibrasyonlar EN-60079-29-2 standartlarına göre yapıldı. Mevcut gazların ağırlıkları ve kullanılan pompanın çekiş gücü ayarlandı.

- Hata payı (%1)
- Veri toplama sıklığı: Her değişimde.

Sensör yerleşimi, gazların yükselme eğilimleri, batarya hücresinin yerden yüksekliği ve yangın öncesi gazın yayılım yönü göz önüne alınarak belirlendi.

Test düzeneğinde:

- Sensörler batarya ile aynı yatay düzlemde, yaklaşık 30-40 cm mesafede konumlandırıldı.
- Gazların yoğunluğu dikkate alındı: Örneğin CO ve H₂ gibi hafif gazların yukarı yönlü hareketi nedeniyle sensörler bataryanın üst kotuna yakın yerleştirildi. Aynı zamanda HCl gibi ağır gazları

da yakalayabilmek adına sistem için pompa ile emiş gücü üretildi.

- Olası alev veya patlama durumunda sensör zararını önlemek adına, sistem koruyucu muhafaza içine alındı.

- Algılama hassasiyeti test edilerek “en erken alarm süresi alınan nokta” referans alındı.

Projede kullanılan sensörler:

Prosense Gaz Dedektörleri

- Sensör Tipi: Elektrokimyasal (CO, H₂S, HCl, HF gibi toksik gazlar için) ve PID (VOC’ler için)
- Çıkış: 4-20 mA analog sinyal + RS485 MODBUS

- Besleme Gerilimi: 18–32 VDC

- Alarm Eşikleri: 3 seviye + overrange

- Tepki Süresi: Anlık

- Koruma: IP65, ATEX Zone 1 uyumlu

Ek olarak test ortamında sıcaklık ve nem kayıtları manuel olarak ölçülmüştür.

Sensörlerin Doğrulanabilirlikleri (Güvenilirlik Kontrolü)

Her test öncesinde sensörler:

- Standart test gazlarıyla sahada doğrulandı (örneğin CO için 100 ppm test gazı).

- Alarm seviyeleri, manuel butonla test edildi (sistem işlevsellik kontrolü).

- Sensörlerin çalıştığına dair analog çıkışlar doğrulandı (multimetre ile 4–20 mA sinyali)

Ayrıca, her sensör için “zero” ve “span” fonksiyonları kontrol edildi.

Kalibrasyon Detayları

Prosense dedektörleri, projede kullanılmadan önce firmanın teknik servisi tarafından sertifikalı kalibrasyon cihazları ile fabrika ortamında ve yerinde kalibre edilmiştir.

Kalibrasyon süreci:

- Her sensör için hedef gaz ile 2 noktalı kalibrasyon yapılmıştır.

Veri Toplama Sıklığı

Prosense dedektörler, sürekli sinyal üretmektedir.

Bu sinyal:

- Deney sırasında görüntü kayıtları ile zaman eşleştirilerek değerlendirildi.

Sensörlerden gelen alarm sinyalleri ve alarm LED/sesli uyarılar kronometre ile eş zamanlı kaydedildi.

Hata Payları ve Belirsizlikler

Her sensör için hata payı, üretici verilerine göre değerlendirildi:

- Tüm sensörler için $\pm\%1$ doğruluk sapması

- Ortam rüzgarı ve hava akımı, gazın yayılım şeklini etkileyebilir

- Deneydeki gaz çıkışı doğrudan değil, reaksiyon bazlı olduğu için gaz konsantrasyonu kontrol edilememiştir.

Bu nedenle mutlak değer yerine tepkime zamanı ve sıralaması esas alınmıştır.

- Sensörlerin emiş noktaları batarya hücresi ile aynı düzlemde ve 30-40 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiştir.

- Hafif gazların (H₂, CO) yükselme eğilimi dikkate alınarak üst kotlara yakın yerleştirildi.

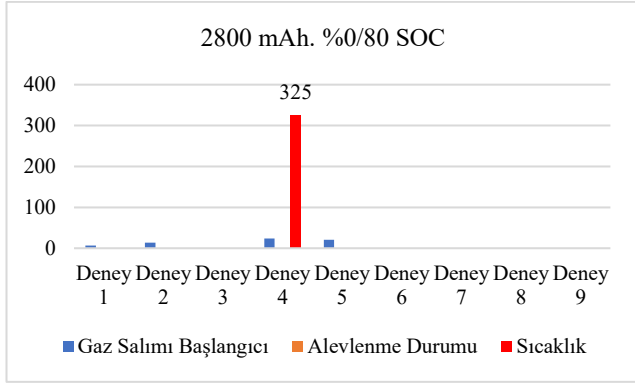
- Emiş sistemi HCl gibi yoğun gazların sarkma eğilimi nedeniyle zemine daha yakın bölgeden de gaz çekebilecek şekilde yapılandırıldı.

- Pompanın algılama hassasiyeti en erken alarm alınan senaryo baz alınarak emiş gücü kalibre edildi.

- Sensörler fiziksel darbe, sıcaklık ve alev hasarlarına karşı sistem özel muhafaza içine alındı.

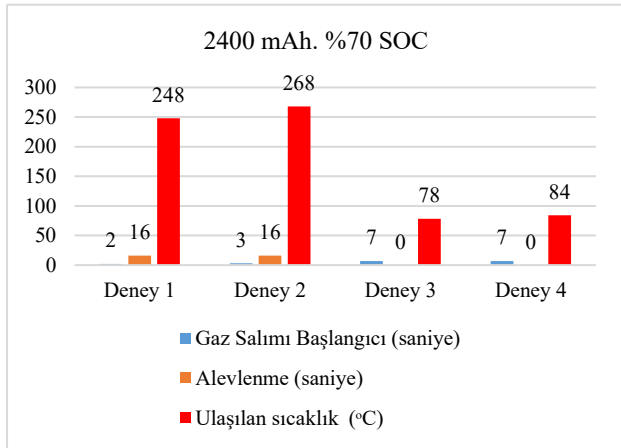
3. BULGULAR VE YORUMLAR

Teknolojik gelişmelere öncülük eden lityum iyon bataryalar taşınabilir enerji depolama sistemlerinin en önemli bileşeni olarak kullanılmaktadır. Mekanik, elektriksel veya termal zararlar oluştuğunda ciddi güvenlik sorunları ortaya çıkabilir. Pil sıcaklığının artmasıyla birlikte başlayan termal kaçak süreci erken fark edilmezse yangın veya patlamalarla karşılaşılabilir. Bu nedenle salınan gazların erken tespiti pil güvenliği için önemlidir. Pillerin SOC durumu termal kaçak süreciyle yakından ilgilidir. Çivi testine karşı aynı ortam koşullarında % 0-60-70-80 SOC durumlarında 2400-2800-3600-4800 mAh. Gücünde 30 farklı pil gözlemlendi. Pilin darbe aldığı yer, darbe açısı, SOC durumu, pil kimyasının oksijenle buluşması, delinmenin kaç noktadan gerçekleştiği vb. birçok faktörün önem arz ettiği ortaya konuldu. H₂, VOC, HCl, % LEL ve CO₂ gaz salımları ve ulaştığı ppm değerleri sensörler vasıtasıyla incelendi. Çivi darbesi alan piller alev almadan önce gaz salımının başladığı gözlemlendi. Pillerin sıcaklık ölçümleri termal kamera ile gerçekleştirildi.



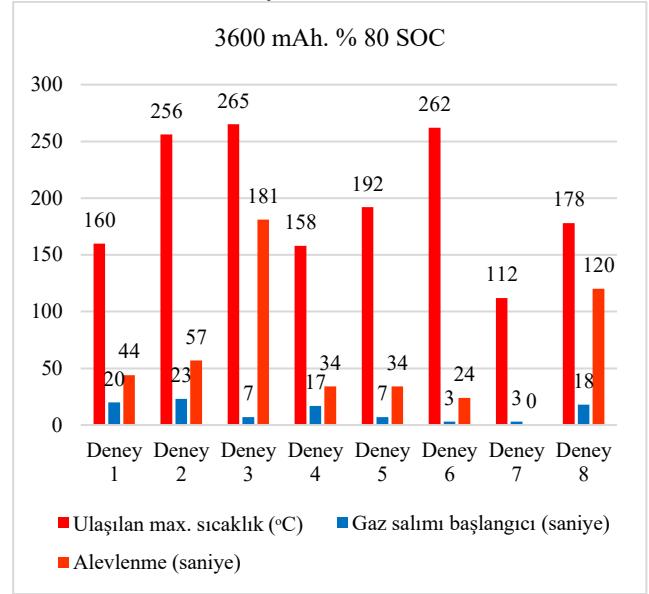
Şekil 6. 2800 mAh. % 0 ve 80 SOC

% 0 ve % 80 SOC seviyesinde 2800 mAh. gücünde ve farklı özelliklerde 9 pil çeşitli dış etkenlere maruz bırakılarak gözlemlendi. Gaz salımı 7-24 sn. aralığında gerçekleşti. Ulaşılan en yüksek sıcaklık 325 °C olarak kaydedildi.



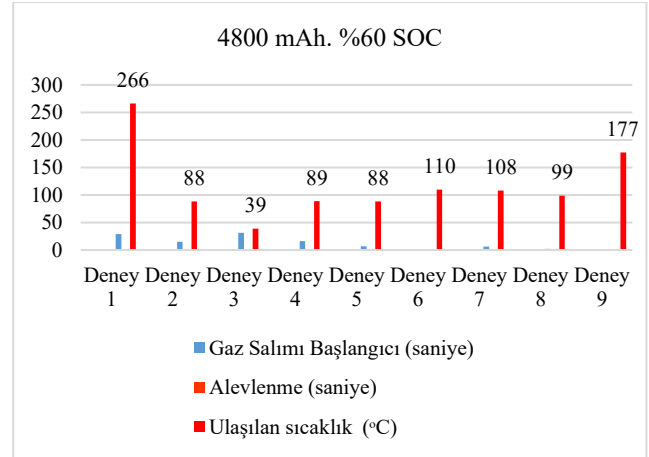
Şekil 7. 2400 mAh. % 70 SOC Gaz Salımı-Alevlenme-Sıcaklık Grafiği

% 70 SOC seviyesinde 2400 mAh. gücünde 4 pil ayrı ayrı delinerek gözlemlendi. Gaz salımı 2-7 sn. aralığında gerçekleşti. Pillerden 2 tanesi alev alırken 2 tanesinde alevlenme gözlemlenmedi. Pillerin ulaştığı max. sıcaklık 268 °C olarak kaydedildi.



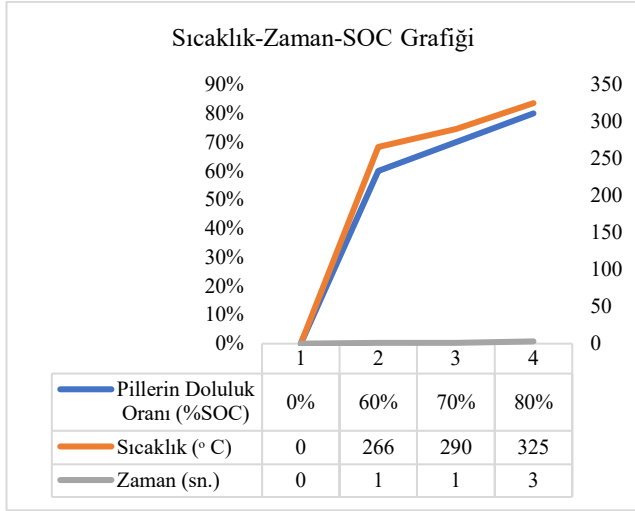
Şekil 8. 3600 mAh. % 80 SOC Gaz Salımı-Alevlenme-Sıcaklık Grafiği

% 80 SOC seviyesinde 3600 mAh. gücünde 8 pil ayrı ayrı delinerek gözlemlendi. Gaz salımı 3-23 sn. aralığında gerçekleşti. 7 pil alev alırken 1 tanesinde alevlenme olmadı. Ulaşılan max. sıcaklık 265 °C olarak kaydedildi.



Şekil 9. 4800 mAh. % 60 SOC Gaz Salımı-Alevlenme-Sıcaklık Grafiği

% 60 SOC seviyesinde 4800 mAh. gücünde 9 ayrı pil tek tek delinerek verileri kaydedildi. Bu pillerden hiçbirinde alevlenme gözlemlenmedi. Gaz salımı 1-29 saniye aralığında gerçekleşti. Pillerin ulaştığı max. Sıcaklık 266 °C kaydedildi. % 0 ve % 60 seviyesindeki pillerde alevlenme olmadı. Bu pillerde sadece HCl salımı gözlemlendi. Gerçekleştirilen deneylerde en yüksek HCl 15 ppm, VOC 49 ppm, H₂ 253 ppm, CO 254 ppm ve HC % 6 LEL olarak kaydedildi.



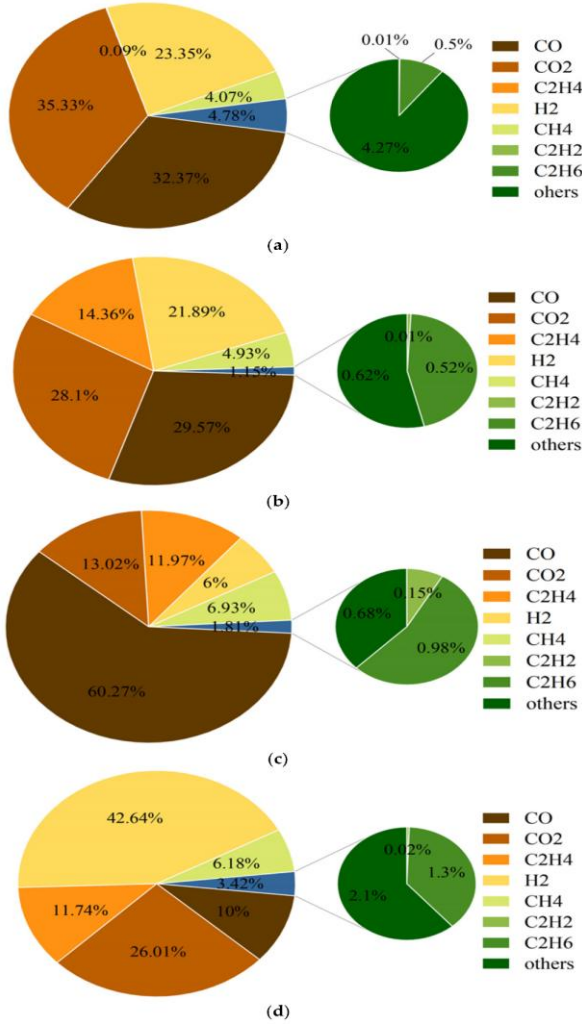
Şekil 10. Sıcaklık-Zaman-SOC Grafiği

Lityum iyon pillerin elektrolitinde bulunan lityum tuzları termal kaçak sırasında HCl (hidrojen florür) üretebilmektedir. Tam olarak yanamayan bileşikler nedeniyle CO (karbonmonoksit) salımı gerçekleşebilmektedir. İdeal yanma süreci gerçekleştiği takdirde CO₂ (karbondioksit) çıkışı başlayabilmektedir. Pil içeriğinde kullanılan organik çözücüler ise organik bileşiklere dönüşebilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda termal kaçak sürecinde salım gösterebilme ihtimali olan gazları sensörler vasıtasıyla izleyebilmek önemlidir. Gazların erken aşamada fark edilebilmesi pilin güvenliğini arttırabilir. Bu nedenle yangın ve patlama riskini azaltabilmek için pillerin güvenli yönetimi oldukça önem arz etmektedir.

4. SONUÇLAR

Lityum iyon pillerin güvenliği için pil yönetim sistemlerinin çok iyi bir durumda olması, dış etkenlere bağlı olarak alacakları ısı kaynaklı pil sıcaklığının artışı, pilin karşılaşabileceği darbeler sonucu gaz salımının başlaması yüksek ihtimaldir. Erken tespit sistemleriyle yapılabilecek iyileştirme çalışmaları pil güvenliğini arttırabilir. Lityum iyon pillerin elektrolitinde bulunan lityum tuzları termal kaçak sırasında HCl üretebilmektedir. Tam olarak yanamayan bileşikler nedeniyle CO salımı, ideal yanma süreci gerçekleştiği takdirde CO₂ çıkışı, pil içeriğinde kullanılan organik çözücüler organik bileşiklere dönüşebilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda termal kaçak sürecinde salım gösterebilme ihtimali olan gazları sensörler vasıtasıyla izleyebilmek önemlidir. Gazları erken aşamada fark ederek yangın ve patlama riskini azaltabilmek için pillerin güvenli yönetimi dikkate alınmalıdır. Pillerin SOC durumları termal kaçak sürecini ilgilendiren bir durumdur. Piller

ortalama % 60-70 SOC seviyelerinin üzerinde iken ve pil sıcaklığı 90 °C' nin üzerine çıkmaya başladığında termal kaçak gözlemlenebilir. Yapılan deneylerde % 0-60-70-80 SOC seviyelerinde 2400-2800-3600-4800 mAh. gücünde 18650 hücre boyutlu lityum iyon piller bir çivi yardımıyla delinerek sonuçları gözlemlendi. Darbenin geldiği yer, pillerin SOC durumu, pil kimyasının oksijenle buluşması, darbe açısı, delinmenin birkaç notadan gerçekleşmesi vb. birçok faktörün termal kaçak sürecini etkilediği gözlemlendi. Bataryalar aşırı şarj edilerek içindeki kimyasal reaksiyonlar hızlandığında, aşırı deşarj durumunda bataryanın iç yapısı zayıflayarak veya batarya hücreleri arasında, dış bağlantılarında meydana gelen kısa devreler yüksek akıma neden olduğunda aşırı ısı üretimi gerçekleşebilir. Bataryalarda kullanılan elektrolit malzemelerinin kalitesi, üretim kaynaklı hatalar veya hücrelerin yerleştirilmesindeki dengesizlikler de termal kaçak riskinin artmasına neden olabilir. Çevresel sıcaklıklar da bataryanın iç sıcaklığını doğrudan etkiler. Bataryalar aşırı sıcak ortamlarda çalıştırıldığında kimyasal reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşebilir. Eğer batarya yönetim sisteminde bir arıza meydana gelirse hücreler arasındaki denge bozulabilir. Batarya hücresine gelebilecek darbe, çarpma veya delinme gibi fiziksel hasarlar bataryanın iç yapısının bozulmasına, kısa devreye veya kimyasal reaksiyonların kontrolden çıkmasına neden olabilir. Bataryalar zamanla kapasitesini kaybeder, iç yapısı bozulabilir ve verimliliği düşebilir. Bu durum sonucunda da hücreler fazla ısı üretmeye meyilli hale gelerek termal kaçak olasılığını arttırabilir. Hücreler arasında performans farkları oluşursa bazı hücreler fazla ısınarak termal kaçak riskini artırır. Termal kaçak genellikle zincirleme bir olay sonucu ortaya çıkarak ciddi güvenlik tehlikelerine yol açar. Bu nedenle bataryaların doğru şekilde şarj edilmesi, uygun sıcaklık aralıklarında tutulması ve düzgün bir şekilde yönetilmesi çok önemlidir. Yapılan bir çalışmada farklı sistemlere sahip dört çeşit LIB' nın yüzey sıcaklığı, voltaj değişimi, kütle kaybı ve gaz üretim karakteristik parametreleri incelenmiş, pillerinin termal kaçak sürecinde CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄ ve diğer gazlar ürettiği ortaya konulmuştur [34].



Şekil 10. Dört numunenin gaz üretim bileşimi ve hacim yüzdesi. (a) Numune No.1 (NCM622). (b) Numune No.2 (NCM811). (c) Numune No. 3 (NCM9/0.5/0.5). (d) Numune No. 4 (LFP).

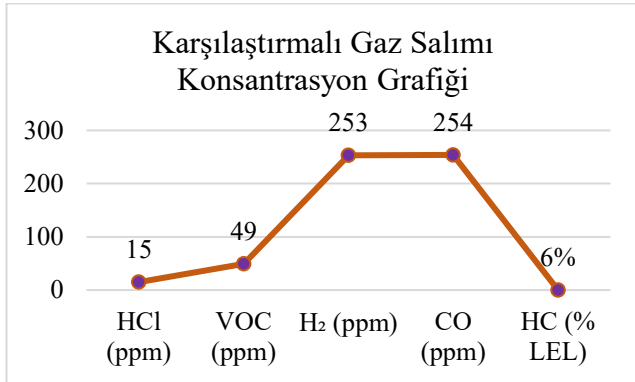
Başka bir çalışmada, 18650 hücre boyutlu lityum iyon pilin farklı şarj durumlarında (SOC: %100, %50) gaz üretim dinamikleri kalorimetre ve standart bir gaz geçirmez kutu kullanılarak araştırılmış ve gaz üretim sürecinin dört aşamaya ayrıldığı ancak her aşamanın veri güvenilirliğinin değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [35]. Bir çalışmanın sonucunda pillerde ayırıcı büzülmesi, termal kaçak süreciyle ilgili kısmi hücreler üzerinde araştırma yapmak, pil sıcaklığı, sıcaklık dağılımı ve iç basınç dahil olmak üzere pil çalışmasının iç durumunu izlemek, oksijenin varlığının patlamalara yol açma hızı ve her reaksiyonun üretebileceği oksijen miktarının araştırılması önerilmektedir [36]. Wang ve ark. LIB'lerin risk değerlendirmesinin ayrıntılı bir incelemesini yaptılar [37]. Temel olarak riskleri çeşitli pil kötüye kullanım testlerine göre değerlendirdiler [38]. Bu geçmiş çalışmalar batarya yangın riski hakkında bazı temel bilgiler sağlamıştır [39]. Bu bilgiler LIB'lerin termal güvenliğinin tasarımını

desteklemiş olsa da [40] büyük ölçekli pillerin yangın dinamikleri hakkında hala pek çok bilinmeyen mevcuttur [41]. Elektrikli araç yangınlarının termal tehlikesi [42], geleneksel araç yangınları ile karşılaştırılabilir [43]. Hibrit elektrikli araçlar, ciddi bir çarpışmadan sonra aynı yangın riskine sahip olabilir [44]. Artan elektrikli araç sayısı ile birlikte, LIB'ler ve elektrikli araçlarla ilgili yangınların yaşanması endişesi de artmaktadır [45]. Çünkü geri dönüşüm planlarının hazırlanması gerekmektedir. Avrupa'da LIB'lerin yalnızca % 5 kadar azı geri dönüştürülmektedir [46]. Pil atıkları ekolojimizi kirletebilir. Pillerin imha edilmesi sırasında hiç şüphesiz potansiyel yangın riskleri vardır. Bu risk, dikkate alınan LIB'nin SOC durumu ve kapasitesi ile bağlantılıdır. Bu nedenle, pillerin toplanması ve elektrikli araçların bertarafı sırasında yangın riskinin artması muhtemeldir [47,48]. Gelecek araştırmalarda farklı batarya tipleri ve daha geniş çevresel koşulların etkileri incelenebilir. Bataryalarda gaz salımını azaltmaya yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi, güvenli kullanım, yangınlarının söndürülmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi önem arz etmektedir. LIB gaz salımı davranışları batarya güvenliği açısından önemli bir konu olup, bu alandaki gelişmeler enerji depolama sistemlerindeki teknolojinin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

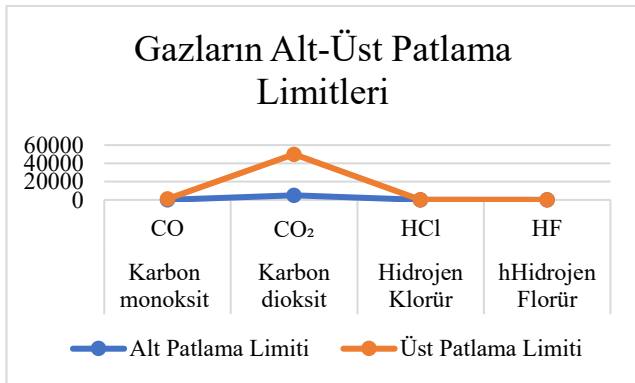
Pil güvenliğini gaz yanıcılık sınırına göre değerlendirmenin iki yönü vardır. Birincisi gaz yanıcılık alt sınırının büyüklüğüdür. Yanma reaksiyonunun üç unsuru (yanıcı madde, ısı, oksijen) açısından gazın yanıcılık sınırı ne kadar düşükse, yakıcı olarak hareket etmesi o kadar kolay olur ve böylece yanma ve patlama olasılığı da o kadar artar. İkincisi yanıcı konsantrasyon aralığıdır. Ortamda bulunan yanıcı gaz konsantrasyonunun alt ve üst patlama limiti aralığı ne kadar genişse yanma ve patlama koşullarını karşılaması o kadar kolay olur. Alt patlama limitinden düşük veya üst patlama limitinden yüksek konsantrasyonda bulunan yanıcı gaz yoğunlukları yangın ve patlamalara neden olmaz. Bu nedenle salım gösteren gazların yoğunluklarının erken tespiti ile önlemler alınabilir.

Tablo 3. Çalışmadan Elde Edilen Bulgular

Pil güvenliğini gaz yanıcılık sınırına göre değerlendirmenin iki yönü vardır. Birincisi gaz yanıcılık alt sınırının büyüklüğüdür. Yanma reaksiyonunun üç unsuru (yanıcı madde, ısı, oksijen) açısından gazın yanıcılık sınırı ne kadar düşükse, yakıcı olarak hareket etmesi o kadar kolay olur ve böylece yanma ve patlama olasılığı da o kadar artar. İkincisi yanıcı konsantrasyon aralığıdır. Ortamda bulunan yanıcı gaz konsantrasyonunun alt ve üst patlama limiti aralığı ne kadar genişse yanma ve patlama koşullarını karşılaması o kadar kolay olur. Alt patlama limitinden düşük veya üst patlama limitinden yüksek konsantrasyonda bulunan yanıcı gaz yoğunlukları yangın ve patlamalara neden olmaz. Bu nedenle salım gösteren gazların yoğunluklarının erken tespiti ile önlemler alınabilir.



Şekil 11. Karşılaştırmalı Gaz Salımı Konsantrasyon Grafiği



Şekil 12. Gazların Alt-Üst Patlama Limitleri [49]

KAYNAKÇA

[1] Wada, M., (2009). Research and Development of Electric Vehicles for Clean Transportation. *Journal of Environmental Sciences*, 21(6), 745-

SOC	mAh. Gücü	Deney Sayısı	Max. Sıcaklık	Gaz Salım Süreleri (sn.)	Alevlenme Durumu	En Yüksek Sıcaklık	En Düşük Gaz Salımı
%0	2800	9	325	7-24	5 tanesi alev aldı	*	-
%80	4800	9	266	1-29	Yok	-	*
%70	2400	4	290	2-18	2 tanesi alev aldı	-	-
%80	3600	8	265	3-23	7 tanesi alev aldı	-	-

Bu çalışmada, farklı mAh. güç ve SOC durumlarına sahip 30 pil darbe etkisine maruz bırakılarak gaz salım dinamikleri, sınırlı hava sirkülasyonuna sahip, gözlem ve veri kaydına uygun şekilde tasarlanmış açık alanda gerçekleştirildi. Aynı ortam sıcaklığı ve nem koşullarına sahip deney alanında gaz konsantrasyonları sensörler tarafından algılanarak aşağıdaki veriler elde edildi:

- 30 pilden 14 tanesi alev aldı.
- Ulaşılan max. Sıcaklık 325 °C kaydedildi. Bu pil 2800 mAh. gücünde ve %80 SOC durumuna sahip.
- Ortalama gaz salımı süresi darbeden sonraki 1-29 sn. aralığında gerçekleşti.
- % 80 SOC durumuna sahip 16 pilden 12 tanesi alev aldı.
- Gaz salımı başladıktan ortalama 25 sn. sonra alevlenme gözlemlendi.
- Tek noktadan darbe alan pillerde gaz salımı ve alevlenme oranı daha düşük iken ikinci bir noktadan darbe alan pillerde bu oran daha yüksek olarak kaydedildi.
- Pilin enerji yoğunluğu ne kadar yüksekse, üretilen CO gazı konsantrasyonu o kadar yüksek olur. Bu çalışmada en yoğun gaz konsantrasyonu CO 254 ppm ile 2800 mAh.%80 SOC durumundaki pilde kaydedildi.

749. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62335-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62335-9).

[2] Gong, H., Du, T., Luo, W.B., Yang, D. & Zhou, L.F. (2020). The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries. *Frontiers Chem.*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.578044>.

- [3] Caetano, R. E., Camargos, P., Ribeiro, G. S., Santos, I. R., & Santos, P. H. J. (2022). Perspectives on Lithium Ion Battery Categories For Electric Vehicle Applications: A Review of State of the Art. *Int. J. Energy Res.*, 46(13), 19258–19268. <https://doi.org/10.1002/er.7993>.
- [4] Cao, Ş., Çen, M., Ouyang, D., Wang, J., Liu, J. & Wang, Z. (2019). Effects of Heat Treatment and SOC on Fire Behaviors of Lithium İon Batteries Pack. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 2429–2437. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7864-9>.
- [5] Andersson, P., Blomqvist, P., Larsson, F., Lorén, A. & Mellander, B. E. (2014). Characteristics of Lithium Ion Batteries During Fire Tests. *J. Power Sources*, 271, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>.
- [6] Jones, C., Serov, A., Sudarshan, M., & Tomar, V. (2022). *Investigation of Physical Effects on Prismatic Lithium-Ion Cell Electrodes After Partial Nail Puncture Using Raman Spectroscopy and Incremental Capacity Analysis*. 100174, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100174>.
- [7] Wang, H. at al. (2017). *Progressive Mechanical Indentation of Large Format Lithium Ion Cells*. *J. Power Sources*, 341, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.11.094>.
- [8] Howard, J. N. & Maleki, H. (2006). *Effects of Overdischarge on Performance and Thermal Stability of A Lithium Ion Cell*. *J. Power Sources*, 160, 1395–1402. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.043>.
- [9] Hu, X. at al. (2022). *Complex gas formation during combined mechanical and thermal treatments of spent lithium-ion-battery cells*. *Hazardous Mater.*, 431, 128541. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128541>.
- [10] Zhang, Z., (2020). A Novel Method For Screening Deep Eutectic Solvent To Recycle The Cathode Of Li-Ion Batteries. *Green chemistry*, 22(14). <http://dx.doi.org/10.1039/D0GC00701C>.
- [11] Burch, I., Gamble, G., Ghiji, M., Joseph, P., Moinuddin, K., Novozhilov, V., Suendermann, B., (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression, *Energies* 2020, 13, 5117. <https://doi.org/10.3390/en13195117>.
- [12] Mao, B., Stolarov, S. I., Sun, J. & Wang Q. (2019). A Review of Lithium-Ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies. *Energy Combustion Sci.*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.122233>.
- [13] Abraham, D. P., Roth, E. P. Kostecki, R., McCarthy, K., MacLaren S., & Doughty, D. H. (2006). *Diagnostic Examination of Thermally Abused Highpower Lithium-ion Cells*. *J. Power Sources*, 161(1), 648–657. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.088>.
- [14] Feng, X., He, X., Liu, X., Lu, L., Ouyang, M., & Xia, Y., (2017). Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles. *Energy Storage Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>.
- [15] Jones, N., (2024). The New Car Batteries That Could Power The Electric Vehicle Revolution, *Nature*, 626 (7998), 248-251.
- [16] Armand, M. & Tarascon J. M., “Problems and challenges facing rechargeable batteries”, *Nature*, (2001), 414,359,367.
- [17] Chu G., Sun J., & Wang Q. (2005). Lithium-ion Battery Fire and Explosion. *The Science of Fire Safety* 2005, 8, 375–382. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-375>.
- [18] Sun, J. at al. (2016). Toxicity a Serious Concern of Thermal Runaway from Commercial Lithium-ion Battery. *Nano Energy*, 27, 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.031>.
- [19] Nedjalkov, A. at al. (2016). Toxic Gas Emissions From Damaged Lithium Ion Batteries-Analysis And Safety Enhancement Solution. *Batteries*, 2(1), 5. <https://doi.org/10.3390/batteries2010005>.
- [20] Jin, Y. at al. (2020). Detection of Micro-Scale Li Dendrite Via H2 Gas Capture for Early Safety Warning. *Joule*, 4(8), 1714–1729. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.016>.
- [21] Ren, D. at al. (2017). An Electrochemical-Thermal Coupled Overcharge-Tothermal-Runaway Model For Lithium Ion Battery. *J. Power Sources*, (364), 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.035>.
- [22] Chen, W., Jiang, J., Wen, J., (2021). Thermal Runaway Induced by Dynamic Overcharge of Lithium-ion Batteries Under Different Environmental Conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146, 855–863. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10037-x>.
- [23] Cheng, C., Chow, C., Chow, W., & Kwok, J. (2019). An Experimental Study on Potential Ther-

mal Hazards of Mobile Phones. *Third International Fire Safety Symposium*, Ottawa, Ontario, Canada.

[24] Knaust, C., Kwade, A., Palis, S., Sträubig, F., & Voigt, S. (2020). CFD Analysis of Sensible Enthalpy Increase Approach to Determine Heat Release Rate of Lithium-ion Battery Fires at Electric Vehicle Scale. *Yangın Saf. J.*, 114(1). <https://doi.org/102989>.

[25] Sun, J. at al. (2016). Toxicity a Serious Concern of Thermal Runaway from Commercial Lithium-ion Battery. *Nano Energy*, 27, 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.031>.

[26] Mao, B., Stolarov, S.I., Sun, J., & Wang, Q. (2019). Review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Prog Energy Combust Sci*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>.

[27] Abraham, D. P., Roth, E. P. Kostecki, R., McCarthy, K., MacLaren S., & Doughty, D. H. (2006). *Diagnostic Examination of Thermally Abused Highpower Lithium-ion Cells*. *J. Power Sources*, 161(1), 648–657. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.088>.

[28] Shi, H., Cheng, M., Feng, Y., Qiu, C., Song, C., Yuan, N., Kang, C., Yang, K., Yuan, J., & Li, Y. (2023). Thermal Management Techniques for Lithium-ion Batteries Based on Phase Change Materials: A Systematic Review and Future Recommendations. *Energies*, 16 (2), 876. <https://doi.org/10.3390/en16020876>.

[29] Kim, J. et al. “State Of Health Monitoring By Gas Generation Patterns In Commercial 18,650 Lithium-Ion Batteries,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 907, p. 2022, doi: 10.1016/j.jelechem.2021.115892.

[30] Yang X., Wang H. (2022). Experimental Study on Thermal Runaway behavior of Lithium-ion Battery and Analysis of Flammable Materials. 8, 250. <https://doi.org/10.3390/piller8110250>.

[31] Binbin, M., Chunpeng, Z., Conner, F., Hanwei, Z., Haodong, C., Partha, P., Jinhua, S. & Quinsong, W. (2022). Experimental And Modeling Investigation On The Gas Generation Dynamics of Lithium-Ion Batteries During Thermal Runaway. <https://doi.org/10.1016/j.etrn.2022.100212>.

[32] Cui, Y., Gao, JF., Guo, DL., Jiang, X., Jin, Y., Liu, Y., Lu, HF., Sun, L., Tao, FB., Wei, DH., & Zheng, Z.K. (2020). Detection of micro-scale li

dendrite via -2 gas capture for early safety warning. 1714–1729.

[33] Fauler, G., Golubkov, W., Planteu, R., Schickl, S., Stangl, C., Voitic, G., & Wiltzsche, H. (2015). Thaler A. and V. Hacker (Paper) *RSC Adv.*, 5, 57171–57186. <https://doi.org/10.1039/C5RA05897J>.

[34] Yang X., Wang H. (2022). Experimental Study on Thermal Runaway behavior of Lithium-ion Battery and Analysis of Flammable Materials. 8, 250. <https://doi.org/10.3390/piller8110250>.

[35] Binbin, M., Chunpeng, Z., Conner, F., Hanwei, Z., Haodong, C., Partha, P., Jinhua, S. & Quinsong, W. (2022). Experimental And Modeling Investigation On The Gas Generation Dynamics of Lithium-Ion Batteries During Thermal Runaway. <https://doi.org/10.1016/j.etrn.2022.100212>.

[36] Panahi, A. & Dai, Y. (2025). Thermal Runaway Process in Lithium-Ion Batteries: Next Energy 6 100186 <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100186>.

[37] Mao, B., Stolarov, S.I., Sun, J., & Wang, Q. (2019). Review of lithium-ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Prog Energy Combust Sci*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>.

[38] Chen, S.C., Wang, Y.Y., Wan, C.C. (2006). Thermal analysis of spirally wound lithium batteries. *J Electrochem Soc*, 153, 637. <https://doi.org/10.1149/1.2168051>.

[39] Ramadass, P., Santhanagopalan, S., Zhang, & Zhengming, J. (2009). Internal short circuit analysis in a lithium-ion cell. *Power Sources*, 194, 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.05.002>.

[40] Finegan, D., Robinson, J.B., & Scheel, M. at al. (2015). High-speed tomography processing of lithium-ion batteries during thermal runaway. *Nat Commune*, 6, 6924. <https://doi.org/10.1038/ncomms7924>.

[41] Cai, L., & White, R.E. (2011). Mathematical modeling of a lithium-ion battery with thermal effects in Multiphysics (MP) software. *J. Power Sources*, 196, 5985–5989. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.017>.

[42] Kim, G.H., Pesaran, A., Spotnitz, R. (2007).

A Three-Dimensional Thermal Abuse Model for Lithium-ion Cells. *J. Power Sources*, 170,476–489. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.018>.

[43] Mahamud, R., Park, C. (2011). Reciprocating airflow to improve temperature uniformity for Li-ion battery thermal management. *J. Power Sources*, 196, 5685–5696. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076>.

[44] U.S. Department of Transportation. (2014). Interim Guidance for Electric and Hybrid Electric Vehicles Equipped with High-Voltage Batteries. DOT HS 811 575.

[45] Gardiner, J. (2017). The Rise of Electric Cars Could Leave us with a Major Battery Waste Problem. *The Guardian*.

[46] Polinares (2012) Bilgi Notu: Lityum. GLOBAL 2000 VerlagsgesmbH.

[47] Liu, Y., Sun, P., Niu, H., at al. (2020). Self-Heating Ignition Tendency of Open Circuit Pouch Lithium-ion Battery Stack at a Hot Boundary. *Fire Safety Journal*.

[48] He, X., Restuccia, F., Zhang, Y., at al. (2019). Experimental Study on Self-Heating Ignition of Lithium-ion Batteries During Storage and Transportation: Effect of Cell Number. *Fire Technology*.

[49] Özyılmaz, H.S. (2018). “Yangının Kimyası”. Yangın Okulu Türkiye’nin Yangın Bilgi Portalı.